نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۳۶، ۲، ۱۴۰۲. (۴۰-۲۱)



انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی*

مقاله پژوهشی

مرضیه اکبری[۱] علی‌محمد روستا[۲] علی علی‌پور منصورخانی[۳] حامد عنایتی[۴]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.80437.1207

چکیده *در این تحقیق به بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی بر اساس روش مدل‌سازی نرم‌افزاری پرداخته شد. به منظور انجام تحقیق قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه، با سیستم بادبندی زانویی هم‌محور و برون‌محور به شکل هشتی در نظر گرفته شد و با استفاده از روش نرم‌افزاری SAP و ABAQUS تحلیل و بررسی گردید. در این خصوص در ابتدا با مدل‌سازی قاب‌ها در نرم‌افزار SAP، قاب‌ها تحلیل و طراحی گردید و مقاطع قاب‌ها مشخص شد. در ادامه قاب در نرم‌افزار ABAQUS تحت بار آتش سوزی تحلیل شد. سپس بعد از مشخص شدن المان‌های بحرانی، مجددا در نرم‌افزار SAP قاب بدون و با حذف المان‌های بحرانی به صورت پی‌درپی تحت بار حریق تحلیل شد تا میزان انرژی نمونه قاب‌ها در هر حالت بررسی و مقایسه شود. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب با بادبند زانویی برون‌محور و هم‌محور مشخص گردید که نوع بادبند برون‌محور تأثیر بسیار قابل توجهی را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبندی هم‌محور داشته است. قاب‌های ۳ و ۶ و ۹ طبقه با بادبند برون‌محور زانویی، انرژی به ترتیب در حدود ۳۵ و ۵۰ و ۶۵ درصد کمتر از قاب با بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در بازه زمانی کل آن داشته است.*

واژه‌های کلیدی فروریختگی پیش‌رونده، سازه فولادی، بادبند زانویی، بار آتش‌سوزی، استهلاک انرژی.

Investigation of Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading

Marzieh Akbari Ali Mohammad Rousta Ali Alipour Mansourkhani Hamed Enayati

Abstract *In this research, the progressive collapse of braced frames with knee braces in steel structures under fire load was investigated based on the software modeling method. In order to carry out the research 3, 6 and 9-story steel frames with coaxial and off-axis knee bracing systems were considered in the shape of inverted-V and were analyzed and analyzed using the software method and ABAQUS and SAP software. In this regard, at first, the frames were analyzed and designed by modeling the frames in SAP software, and the sections of the frames were determined. In the following, the frame was analyzed in ABAQUS software under the fire load. the frame without and with the removal of the critical elements was analyzed successively under the fire load in the SAP software to check and compare the energy of the frame samples in each case based on the results obtained from the analysis. Based on the study conducted on the frame with off-axis and coaxial knee bracing, it was determined that the bracing type of off-axis had a significant effect on reducing the energy of the frame compared to the coaxial bracing system. The 3, 6 and 9-storyframes with off-axis knee bracing had 35%, 50% and 65% less energy than the frames with coaxial knee braces during the fire and in the entire time period.*

Key Words Progressive Collapse, Steel Structure, Knee Brace, Fire Load, Energy Dissipation

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۳می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۳) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۴) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و فناوری مازندران.

Email: arousta@yu.ac.ir

مقدمه

تخریب پیش‌رونده به مثابه یک واکنش زنجیره‌ای با گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه، باعث از هم فروپاشیدن جزئی و یا کلی سازه می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در رابطه با خرابی سیستم‌های سازه‌ای صورت گرفته است. این مطالعات، اهمیت پدیده خرابی پیش‌رونده را ، که از بارگذاری غیرعادی مانند ضربه ناشی از برخورد وسیله نقلیه با سازه، زمین‌لرزه، انفجار، آتش‌سوزی و... ناشی می‌شود مشخص می‌کند. در اسناد دولتی آمریکا راهبردهایی برای طراحی در مقابل گسیختگی پیش‌رونده، جهت کاهش و یا جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده ارائه شده است. در خرابی پیش‌رونده سازه فولادی، خرابی موضعی یک عضو منجر به تغییر شکل‌های قابل توجهی می‌شود که در نهایت انهدام سازه را به همراه دارد که یکی از نمونه‌های آن در کشور ساختمان پلاسکو است. حرارت بالای ناشی از آتش در سازه فولادی باعث می‌شود تا باربری اعضا به طور عمومی و تا حد زیادی کاهش یابد و در نتیجه به راحتی منجر به تخریب پیش‌رونده و فروریختن سازه شود. توجه مهندسان و پژوهشگران بعد از آسیب‌دیدگی بخشی از ساختمان رونان پوینت در لندن در سال ۱۹۶۸ به این موضوع جلب شد. بعد از حادثه تخریب برج‌های جهانی در سال (۲۰۰۱) چندین مؤسسه تحقیقاتی برای اصلاح این وضعیت و به دست آوردن روش‌های طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده تشکیل جلسه دادند و توجه ویژه‌ای به موضوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مهم صورت گرفت. مؤسسه‌های تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند که ساختمان‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند خرابی موضعی را با پخش کردن انرژی و توزیع در بقیه اعضا، یعنی همان پیدا کردن مسیر جایگزین کنترل کنند [1]. دو روش کلی طراحی مستقیم و غیرمستقیم برای طراحی سازه در برابر تخریب پیش‌رونده وجود دارند. روش‌های مقاوم‌سازی محلی ویژه و مسیر بار جایگزین، از انواع روش‌های طراحی مستقیم است و روش نیروی هم‌بند از روش‌های طراحی غیر مستقیم است [2]. در استانداردهای انگلیس برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده از سه روش طراحی نیروی هم‌بند، مسیر بار جایگزین و روش مقاوم‌سازی محلی ویژه استفاده می‌گردد [3].

پژوهش‌های پیشین

تا به امروز مطالعات زیادی در رابطه با سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی صورت گرفته است. اما بیشتر مطالعات در مورد سازه مهاربندی با بادبند زانویی تحت بار زلزله بوده است. رودریگز و همکاران [4] نتایج مجموعه‌ای از ۱۶۸ آزمایش مقاومت در برابر آتش را روی عناصر فولادی فشرده با کشش حرارتی محدود منتشر کردند. علی و همکاران [5]حالت‌های سقوط در یک قاب یک طبقه را بررسی کردند. آنها دو مد فروپاشی درونی در اثر عمل زنجیره‌ای تیرهای گرما دیده و فروپاشی بیرونی ناشی از انبساط حرارتی تیرهای گرمادیده را معرفی کردند. رفتار شاه تیرها در برابر آتش نقش تعیین کننده‌ای در دو مدل خرابی دارد. کراستی [6]، سازه فولادی یک پارکینگ عرشه باز با قاب فولادی یک طبقه را زیر بار آتش مورد بررسی قرار داد. پیرز و همکاران[7] در دانشگاه کویمبرا مقایسه‌ای از رفتار در برابر آتش در ستون‌های فولادی H و CHS با افزایش حرارتی محدود ارائه دادند. اثرات سطح بار، لاغر بودن و شکل مقطع بررسی شد. بر اساس نتایج، سطح بار، تأثیر زیادی بر عملکرد آتش‌سوزی و مقاومت ستون دارد. افزایش سطح بار، منجر به کاهش دما و زمان بحرانی ستون می‌شود. لاغری ستونها نیز، تأثیر به‌سزایی دارد. با افزایش لاغری دمای بحرانی کاهش می‌یابد. نوع مقطع، تأثیر خیلی جزئی در عملکرد و مقاومت در برابر آتش در ستون‌ها داشت. برای ستون‌های با یک سطح بار و مقادیر لاغری مشابه، دما و زمان بحرانی عملا یکسان بود. جلال و السّاوی[8] در مورد استراتژی‌های مختلف در فروریختگی‌های پیش‌رونده در قاب‌های فلزی طراحی شده برای بار ثقلی را بررسی کردند. پاسخ آنالیز دینامیکی غیرخطی سه بعدی برای سازه‌های ۱۰طبقه با طول دهانه‌های متفاوت با وضعیتی که ستون‌های متفاوت حذف شوند را مقایسه کردند. مشخص شد که نوع بارگذاری بر فروریختگی تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین افزایش استحکام تیرها بسیار مؤثرتر از افزایش سختی است. حقایق، روحانی‌منش و مارنانی[9] به بررسی رفتار قاب فولادی با مهاربند زانویی در برابر زلزله و مقایسه آن با مهاربند ضربدری و شورون پرداختند. در محاسبه ضریب رفتار مدل‌های تحلیلی قاب‌های فولادی مهاربندی شده با مهاربند زانویی، ضربدری و شورون مشخص‌گردید که، علاوه بر اینکه سیستم سازه‌ای مؤثر بر

ضریب رفتار سازه می‌باشد؛ هندسه سازه، ابعاد سازه، تعداد طبقات و همچنین نحوه طراحی اعضا بر این پارامتر مؤثر می‌باشند. هرشاد دی‌محال[10] روش مطالعه تأثیر آتش بر روی سازه فولادی را ارائه کرد. براساس نتایج با بروز آتش‌سوزی در زیر ستون‌ها به علت رخداد پدیده کمانش در ستون یک وضعیت بحرانی در سازه ایجاد می‌شود و ستون تحمل بار ایجاد شده را ندارد و به سرعت افت می‌کند. پارامترهایی مانند لاغری، خارج از مرکز بودن بار و سختی سازه، مورد آزمایش قرار گرفتند. نشان داده شد که در مورد عناصر با بارگذاری متمرکز، هر چه سختی ساختار اطراف بیشتر باشد، دمای بحرانی پایینتر است. پروینی و سعادتمند[11] با هدف بررسی رفتار سیستم قاب خمشی با استفاده از مهاربند زانویی، در معرض خطر فروریختگی پیش‌رونده تحت بارهای ثقلی و لرزه‌ای تحقیقی را ارائه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل پوش‌داون نشان می‌دهد که ظرفیت سقوط پیش‌رونده تحت بار جاذبه، در قاب‌های مهاربند زانویی ظرفیت بیشتری نسبت به قاب‌های مهاربند هم مرکز دارد. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل دینامیک تاریخچه زمانی، سازه‌های دارای قاب با مهاربند همگرا و مهاربند زانویی، از پتانسیل زیادی در سناریوی سقوط پیش‌رونده لرزه‌ای برخوردار هستند. کیم و همکاران [12] تأثیر عملکرد زنجیره‌ای بر پتانسیل فروریختگی پیش‌رونده در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی را مورد بررسی قرار دادند. لو و همکاران [13]، رفتار ساختمان با سازه بتن مسلح را بررسی‌کردند و مشاهده کردند که وجود هسته مرکزی میزان نامعینی سازه را افزایش می‌دهد و مسیرهای مختلفی را فراهم می‌کند که می‌تواند بارهای بر روی ستون‌های آسیب‌دیده را به مناطق سالم انتقال دهد. عبداله زاده و شالیکار[14] اثر مقاوم‌سازی یک قاب مقاوم خمشی فولادی (MRF) با مهاربند ضربدری و Vمعکوس را بررسی‌کردند. مقایسه عملکرد بین مهاربند V معکوس و قاب با سیستم مهاربندی ضربدری، نشان می‌دهد که سیستم‌های مهاربندی V معکوس حدود ۱۰٪ شکل‌پذیری بالاتری را نشان می‌دهند. روح‌اله راه‌نورد و نوید سیاه‌پلو[15] با استفاده از روش اجزای محدود و با به‌کارگیری نرم‌افزار ABAQUS ساختمان ۲۰ طبقه فولادی، با دو نوع سیستم سازه‌ای قاب خمشی و قاب خمشی به همراه مهاربند همگرا و دو نوع سناریوی حذف ستون گوشه و کنار را مورد ارزیابی قرار دادند. با مقایسه مدل‌ها مشاهده گردید که سازه در حالت حذف ستون کناری نسبت به ستون گوشه بحرانیتر است. همچنین مشاهده گردید که تفاوت چندانی بین پاسخ سیستم‌های جانبی مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده وجود ندارد. کردباغ و محمدی [16] به اثرات چشمه اتصال در مقاومت در برابر سقوط پیش‌رونده قاب‌های فولادی پرداختند. طبق مطالعات، ستون گوشه یا ستون میانی سازه، بلافاصله از مدل خارج شد و فروپاشی تدریجی قاب‌ها با تجزیه و تحلیل دینامیکی غیرخطی ارزیابی شد. نتایج به دست آمده به طور خلاصه نشان داد که در نظر گرفتن اثرات چشمه اتصال، باعث افزایش دوران عضو در اتصالات شده و چرخش پلاستیک عناصر و جابه‌جایی عمودی در بالای ستون حذف شده در سازه را افزایش می‌دهد و در نتیجه احتمال سقوط پیش‌رونده را افزایش خواهد داد. محمد و همکاران [17]، یک شاخص از درجه نامعینی سازه را برای ارزیابی توانایی سازه برای حفظ پایداری آن در طول بارگذاری غیرعادی پیشنهاد دادند. اورتن و همکاران [18]، پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) را در بهبود تداوم تیرهای بتن مسلح، برای توزیع مجدد بار تحمیل شده، توسط ستون آسیب‌دیده به یک منطقه سالم، برای کنترل انتشار فروپاشی پیش‌رونده پیشنهاد دادند. آنها در تیرهای دارای آرماتورهای ناپیوسته، بهبودی در حدود ۵۵٪ -۶۰٪ را ثبت کردند. کفاش، کرم‌الدین و مقیمان[19] رفتار قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه فولادی تحت بار آتش پس از زلزله را بررسی کردند. با مقایسه نتایج مقاومت آتش‌سوزی پس از زلزله سازه تحت رکوردهای مختلف نشان داد که در اثر موارد اعمال رکوردهای مختلف، اختلاف قابل توجهی در مقاومت آتش‌سوزی پس از زلزله ایجاد نکرده است. محمدی و همکاران [20] تخریب پیش‌رونده در سازه‌های قاب خمشی فولادی در مطالعه چند پارامتری بررسی کردند. با مطالعه سازه‌های ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه قاب خمشی در OPEN SEES به این نتیجه رسیدند که با کاهش طبقات آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. کائو و همکاران [21] خرابی پیش‌رونده در سازه فولادی تحت تأثیر بار آتش را بررسی کردند و تأثیر نسبت بار و مقاومت اعضای سازه بر رفتار سازه مطالعه کردند. سه حالت فروپاشی جانبی و فروپاشی رو به پایین و فروپاشی ترکیبی جانبی-پایین را تحقیق کردند.

ضرورت تحقیق

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی شده با سیستم بادبند زانویی تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی یا حریق می‌باشد که بالطبع رفتار قاب‌های فولادی به پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع سازه، زمان تداوم حریق و... بستگی داشته که مسئله را از حالت کلی به صورت مطالعات پارامتری تبدیل می‌سازد.

بر این اساس می‌توان هدف اصلی تحقیق را در چند بخش مختلف خلاصه نمود: ۱) آنکه مشخص گردد که تحت بار آتش سوزی چه محدوده و المان‌هایی از قاب تسلیم شده (بر اساس تحلیل حرارتی نمونه‌ها)، ۲) در ادامه حذف المان‌های قاب انجام شود (المان‌هایی که براساس تحلیل انجام شده تسلیم گردیده) تا رفتار قاب تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده تحقیق گردد. در نتیجه حالت بحرانی حذف المان (المان‌ها) تحت اثر بار حریق محقق شود. ۳) سپس به بررسی تأثیر زمان تداوم حریق بر رفتار قاب تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده (حالت بحرانی نتیجه شده از بررسی حالت دوم) پرداخته می‌شود که مرحله سوم کار می‌باشد. ۴) در نهایت و در مرحله آخر مقایسه‌ای بین قاب‌های فولادی تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده (حالت بحرانی نتیجه شده از بررسی حالت دوم) با مهاربندهای هم‌محور و برون‌محور بدون المان زانویی و با المان زانویی انجام می‌گردد و تأثیر المان زانویی بر نتایج تحقیق می‌شود. این چهار بخش بدنه و اساس کار تحقیق را تشکیل می‌دهد که با استفاده از مدل‌سازی نرم‌افزاری انجام می‌گردد. برخی اهداف فرعی و مهم این تحقیق نیز عبارتند از:

الف) نحوه استخراج و معرفی تابع حریق و اعمال بار آتش‌سوزی در نرم‌افزارهای مورد استفاده.

ب) بررسی چگونگی تأثیر زمان دوام آتش‌سوزی بر نتایج به عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر نتایج.

پ) بررسی نکات و ملزومات مدل‌سازی نمونه‌ها و تحلیل آنها به خصوص مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، نوع المان‌ها و تقسیم‌بندی آنها و سایر شرایط مرزی تأثیرگذار بر نتایج.

نتایج این تحقیق می‌تواند مورد توجه و استفاده بخش‌های مختلف و فعال در صنایع مختلف اعم از صنایع نظامی، مراکز مطالعاتی، تحقیقاتی، آکادمیک، دانشگاهی و سازمان‌های دولتی و خصوصی فعال در ساخت و ساز سازه‌های مختلف و از جمله پروژه‌های عمرانی و دانشجویان و اساتید و محققان قرار گیرد. از جمله مهمترین کاربردهای نتایج این تحقیق را می‌توان در خصوص طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر بار آتش‌سوزی دانست که در کشور ما شاید تا به امروز کمتر به آن توجه شده است. لیکن وقوع حوادثی از جمله آتش‌سوزی در ساختمان پلاسکو و... را باید به عنوان نمونه و زنگ خطری دانست که توجه به کنترل و طراحی سازه‌ها در برابر بار آتش‌سوزی را مانند طراحی لرزه‌ای آنها با اهمیت سازد.

شبیه‌سازی

در این پژوهش به تحلیل سازه‌های فولادی قابی شکل با مهاربند زانویی تحت بار آتش در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [22] پرداخته می‌شود که در این خصوص از آنالیز غیرخطی برای تحلیل استفاده می‌گردد. هدف از تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS تعیین المان‌ها و محدوده‌ای از قاب بوده که دارای بحرانی‌ترین شرایط تحت بارگذاری حریق می‌باشد.

به این‌ترتیب با شناسایی این المان‌ها و براساس اولویت‌بندی آنها در ادامه و در نرم‌افزار SAP2000 اقدام به حذف المان‌های باربر بحرانی که به طور معمول در سیستم قاب مهاربندی شده ستون‌ها و بادبندها می‌باشند می‌گردد تا به این ترتیب رفتار نمونه قاب‌ها تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از آتش‌سوزی ارزیابی شود و وضعیت بحرانی برای قاب‌ها با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور مشخص گردد. این طرح شامل قاب با سیستم مهاربندی زانویی به شکل مناسب به نحوی است که دارای کمترین میزان تغییر شکل و تنش و انرژی تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از بار حریق باشد. همچنین طراحی بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور با طراحی بادبندهای هم‌محور و برون‌محور متعارف معمولی نیز مقایسه می‌گردد. اثرات زمان تدوام آتش نیز از جمله پارامترهای مؤثر بر نتایج بوده که در این تحقیق بررسی می‌شود. قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه در این تحقیق مورد توجه بوده و اثر بار آتش بر روی المان‌های آنها بررسی می‌شود. مقاطع ستونها از نوع بال‌پهن و یا باکس، مقاطع تیرها از نوع IPE تک یا دوبل و یا تیرورق و مقاطع مهاربندها از نوع دوبل ناودانی بوده تا با عرف شرایط اجرایی کشور مطابقت داشته باشد. المان زانویی نیز بهتر است

از مقاطع ظریف و با نمره و سختی کم و با شکل‌پذیری بالا (نسبت به المان بادبندی) بوده تا به عنوان فیوز ارتباطی عملکرد مناسبی را داشته و خرابی و گسیختگی در این ناحیه ایجاد گردد که در این صورت می‌توان به راحتی آن را تعویض و بهسازی نمود. جنس فولاد برای سازه‌ها از نوع ST37 می‌باشد و بارگذاری ثقلی براساس مبحث ششم مقررات ملی صورت می‌پذیرد. نوع خاک مورد مطالعه برای سازه‌ها، خاک نوع III می‌باشد و ضریب اهمیت ساختمان نیز برای ساختمان‌های با اهمیت متوسط I=1 بررسی خواهد شد. بارگذاری لرزه‌ای نیز براساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش جدید انجام می‌گیرد.

مراحل گام به گام به منظور مطالعه بر روی قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه به صورت زیر قابل بیان است:

۱) در ابتدا و برای هر یک از قاب‌های نام برده برای دو حالت سیستم بادبند زانویی از نوع هم‌محور و برون‌محور هشتی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، تحلیل حرارتی بر روی قاب‌ها انجام می‌گردد تا در ابتدا محل‌های بحرانی المان‌های قاب‌ها، برای هر حالت بادبند زانویی اعم از هم‌محور و برون‌محور تحت بار حریق مشخص گردند. در این مرحله هیچ المانی از مدل حذف نمی‌شود چون طبیعتا مشخص نیست که تحت اثر آتش‌سوزی چه محدوده و چند المان و کدام المان‌های قاب تسلیم می‌گردند و همچنین اولویت تسلیم المان‌های بحرانی نیز مشخص نیست و با انجام تحلیل حرارتی این مسئله مشخص می‌شود. همچنین زمان شروع خرابی پیش‌رونده براساس نتایج به دست آمده و منحنی‌های انرژی-زمان مشخص می‌گردد.

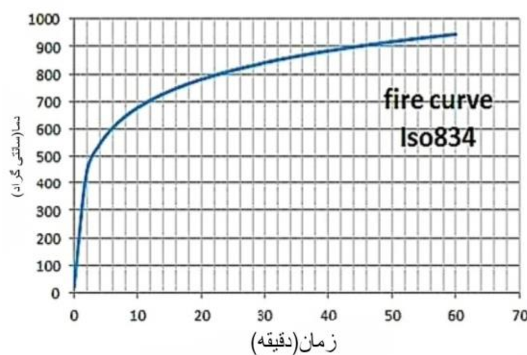
۲-در ادامه قاب‌های بررسی شده در نرم‌افزار SAP مجددا مدل شده و بر اساس نتایج قسمت قبل المان یا المان‌های بحرانی بر اساس سناریوهای مختلف حذف می‌گردند و قاب‌ها بررسی می‌شوند تا بحرانیترین حالت حذف المان برای آنها مشخص گردد.

۳) در مرحله سوم زمان تداوم آتش و تأثیر آن بر بحرانیترین حالت مشخص شده قاب‌ها در حالت قبل بررسی می‌شود.

۴) در نهایت مقایسه‌ای بین رفتار قاب‌های فولادی با المان زانویی و بدون المان زانویی تحت اثر خرابی پیش‌رونده انجام می‌شود تا در شرایط مشابه تأثیر المان زانویی بررسی گردد. به منظور انجام تحلیل بایستی تابع دما-زمان آتش‌سوزی مشخص شود. همچنین مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته نیز به عنوان تابعی از دما بوده که در ادامه هر یک از این موارد مشخص می‌گردند.

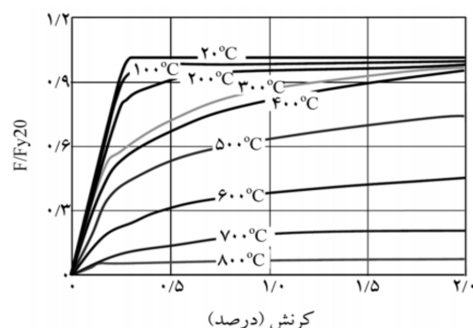
در این تحقیق بار مرده طبقات ۶/۷KN/m^2 و بار زنده طبقات ۱/۹۶KN/m^2و بار مرده بام ۶/۰۳KN/m^2 و بار زنده بام ۱/۴۷KN/m^2تعریف شده است. مدول الاستیسیته ۲۱۰۰۰۰۰Kg/cm^2 و وزن واحد حجم ۷۸۵۰Kg/m^3 و تنش تسلیم ۲۴۰۰Kg/cm^2و تنش نهایی ۳۷۰۰Kg/cm^2 در نظر گرفته شده است.

در ابتدا تابع دما-زمان بایستی مشخص گردد. در این خصوص از تابع دما-زمان به فرم نمودار شکل (۱) استفاده می‌گردد. نمودارهای تنش-کرنش فولاد ساختمانی در دماهای بالا نیز در شکل (۲) نشان داده شده است که بر این اساس لازم است تا اصلاحات لازم بر روی منحنی و مقادیر تنش کرنش فولاد ساختمانی به منظور تحلیل آتش‌سوزی در مقایسه با شرایط عادی انجام گیرد [23].

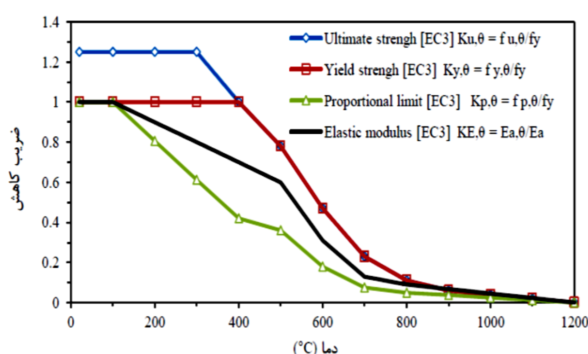


شکل ۱ منحنی زمان-دما استاندارد ایزو ۸۳۴ [23]

در نهایت بایستی مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته مصالح فولادی بر اساس دما اصلاح گردد تا از این مقادیر به منظور تحلیل حرارتی استفاده شود. در این خصوص از منحنی‌های شکل (۳) استفاده می‌شود.



شکل ۲ نمودارهای تنش- کرنش فولاد ساختمانی در دماهای بالا [23]



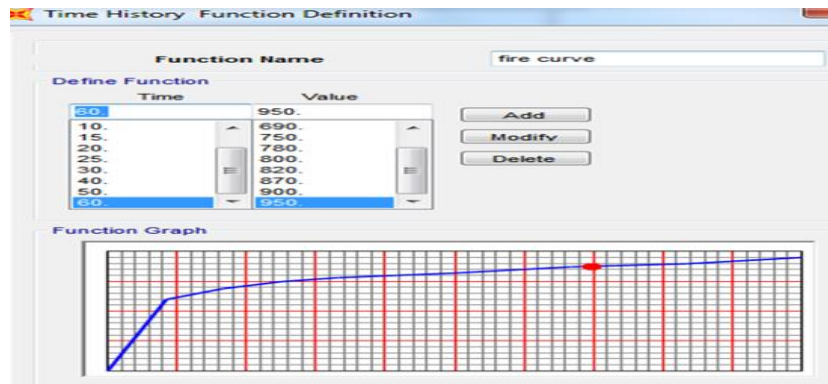
شکل ۳ ضرایب کاهشی روابط تنش- کرنش در دمای بالا برای فولاد ساختمانی [23]

روند مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها

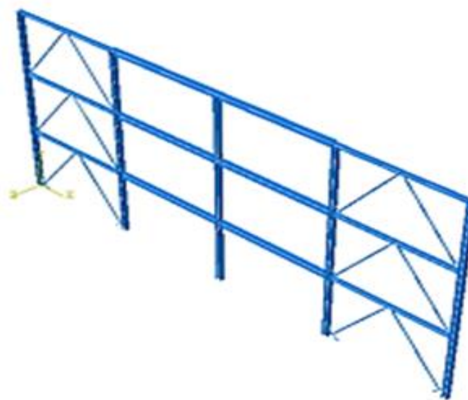
ترسیم هندسه مدل: به منظور ترسیم هندسه مدل در نرم‌افزار ABAQUS نیازی به مدل‌سازی قاب بر اساس استفاده از المان‌های حجمی نبوده و تنها زمان تحلیل و مدل پیچیده می‌گردد. لذا با استفاده از المان‌های خطی قاب در نرم‌افزار مدل می‌گردد. در گام بعدی مشخصات مصالح تعریف می‌شود. این بخش از کار دارای اهمیت بسیار زیادی بوده و در حقیقت نتایج به دست آمده کاملا به این بخش وابسته است. به منظور انجام تحلیل که می‌تواند از نوع استاتیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ و یا دینامیکی باشد مشخصات الاستیک و پلاستیک مصالح فولادی، وزن مخصوص، ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و نهایی وابسته به دما و... برای فولاد بایستی در این بخش به دقت معرفی گردند که این داده‌ها براساس منحنی‌های ارائه شده در شکل (۱ و ۲ و ۳) و توضیحات مربوطه استخراج شده و در نرم‌افزار وارد می‌گردند. در بخش بعدی مشخصات مقاطع تیرها و ستون‌ها که در نرم‌افزار براساس شکل مقطع قابل تعریف است معرفی می‌شوند و این مقاطع به تیر و ستون و بادبند تخصیص می‌یابد.

در ادامه قطعات مختلف مدل اسمبل می‌شوند. در این تحقیق مدل تنها شامل قاب بوده که در یک پارت ترسیم می‌گردد لذا در این بخش اسمبلی برای یک جز تنها یعنی قاب می‌باشد. همچنین به منظور هماهنگی بین نتایج تحلیل در نرم‌افزارها از تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود.

در ادامه شرایط مرزی تعریف می‌گردد. این شرایط مرزی شامل شرایط مرزی تکیه‌گاهی و بارگذاری می‌باشند. پای ستون‌ها به صورت گیردار کامل در نظر گرفته می‌شوند. بارگذاری نیز شامل بارگذاری آتش در نرم‌افزار ABAQUS می‌باشد (بارهای ثقلی شامل وزن المان‌های قاب و بارهای مرده و زنده کف‌ها و بار جانبی زلزله بوده که در نرم‌افزار SAP به منظور طراحی لرزه‌ای قاب در نظر گرفته می‌شود و نتایج طراحی حاصل و مقاطع نهایی در نرم‌افزار SAP به منظور تحلیل آتش‌سوزی در نرم‌افزار ABAQUS در نظر گرفته می‌شود). در نهایت المان‌بندی اعضای قاب انجام می‌گیرد که تعداد تقسیمات المان‌های قاب بایستی براساس میزان شکل‌پذیری قاب در نظر گرفته شود. نوع المان برای تیر و ستون از نوع BEAM برای بادبندها از نوع TRUSS می‌باشد. برای لینک‌های ارتباطی در دو انتهای بادبند نیز استفاده از المان BEAM منطقی و مناسب است و توصیه می‌شود. در نرم‌افزار SAP2000 نیز، هندسه مدل ایجاد گردیده و مقاطع و مشخصات مصالح تعریف می‌شود. نوع تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی فرض می‌شود و در این صورت بایستی تابع حریق مطابق با نمودار شکل (۴) در نرم‌افزار تعریف و ترسیم گردد. سایر مراحل تحلیل به مانند تحلیل سازه‌ها در نرم‌افزار انجام می‌شود. خروجی‌ها نیز همان طور که در قبل بیان گردید شامل توزیع، مقدار حداکثر تنش حرارتی، کرنش حرارتی، تغییر مکان ناشی از آتش‌سوزی، انرژی سازه در حین آتش‌سوزی و در نهایت نیروهای داخلی المان‌های قاب ناشی از اثرات حرارت بر سازه به ازای دماهای مختلف بوده که از نرم‌افزار به صورت عددی و نموداری قابل استخراج است. همچنین در این نرم‌افزار با حذف المان‌های باربر اصلی سازه (که ترتیب حذف آنها بر اساس تحلیل و نتایج آن در نرم‌افزار ABAQUS حاصل شده) رفتار سازه تحت اثر خرابی پیش‌رونده در اثر بار آتش‌سوزی ارزیابی خواهد شد.



شکل ۴ تعریف تابع دما- زمان در نرم‌افزار SAP2000



شکل ۵ نمونه قاب ۳ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی

جدول ۱ مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان‌های مورد نظر

ساختمان	ستون	تیر دهانه اول و آخر	تیر دهانه های میانی	ناودانی
۳طبقه	IPB۲۴۰	IPE۲۰۰	PG۲۲۰×۱۰F۱۲۰×۱۵	۲UNP۱۰۰
۶طبقه	Box۳۵۰×۳۵۰	IPE۲۷۰	PG۳۰۰×۱۰F۱۵۰×۱۵	۲UNP۱۴۰
۹طبقه	BOX۴۰۰×۴۰۰	IPE۲۷۰	PG۳۰۰×۱۰F۲۰۰×۱۵	۲UNP۲۰۰

سازه‌های نمونه

نوع سازه: تمامی سازه‌ها فولادی و به شکل دو بعدی طراحی و تحلیل می‌گردند.

-ارتفاع قاب‌های فولادی: به این منظور سه تیپ قاب به قرار ۳ و ۶ و ۹ طبقه فولادی در نظر گرفته می‌شوند (با ارتفاع هر طبقه برابر با ۳ متر).

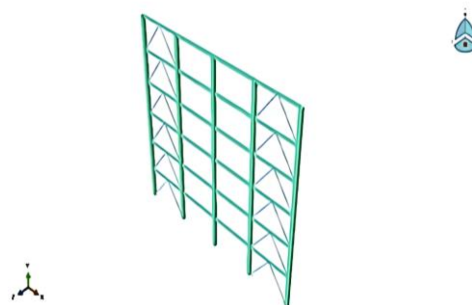
-طول دهانه‌های قاب و دهانه‌های دارای بادبندی: به طور معمول مقدار متعارف در محدوده ۴ تا ۶ متر بوده که در این تحقیق پارامتری، ثابت برابر با ۵ متر برای تمامی دهانه‌های قاب‌های مورد مطالعه فرض می‌گردد.

-نوع سیستم باربر جانبی: در این تحقیق هدف بررسی سیستم بادبندی زانویی از نوع هم‌محور و برون‌محور به شکل هشتی و مقایسه رفتار آنها با مهاربندهای هشتی هم‌محور و برون‌محور معمولی مشابه بدون المان زانویی می‌باشد.

به منظور بررسی بر روی قاب ۳ طبقه در ابتدا قاب با مهاربند زانویی هم محور هشتی و در ادامه قاب با مهاربندی برون محور بررسی می‌گردد. در گام اول قاب در نرم‌افزار SAP تحلیل و طراحی شده است (طراحی لرزه‌ای). در سازه ۳ طبقه مقاطع ستون‌ها از نوع تیرآهن نیم پهن بوده است. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه‌ها ۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۵).

ابعاد مقاطع سازه‌های بررسی شده در جدول (۱) آمده است.

با توجه به اینکه ضریب رفتار قاب با سیستم بادبند زانویی در آیین نامه ۲۸۰۰ تعریف نشده لذا بایستی از روش تحلیل دینامیکی به جای روش تحلیل استاتیکی استفاده نمود. لیکن در این بررسی فرض می‌گردد که المان زانویی به طور کامل تسلیم شده و لذا می‌توان این فرض را نمود که قاب با سیستم مهاربندی از نوع بادبند هم‌محور متداول بوده و ضریب رفتار سیستم بادبندی هشتی معمولی را برای آن در نظر گرفته می‌شود. المان زانویی شکل‌پذیری قاب را افزایش داده که این موضوع ضریب رفتار بالاتری را برای قاب در پی داشته که نتیجه آن ضریب زلزله کمتر و در نتیجه کاهش نیروی برش پایه ناشی از زلزله می‌باشد. لذا طراحی قاب با سیستم بادبند زانویی که براساس سیستم بادبند معمولی مشابه طراحی می‌شود را می‌توان دست بالا دانست که در جهت اطمینان است. در طراحی سازه ۶ طبقه، مقاطع ستون‌ها به شکل باکس و مقاطع تیرها از نوع تیرورق یا IPE استاندارد و مقاطع بادبندها نیز از دوبل ناودانی و در نهایت مقاطع لینک‌های ارتباطی بادبند نیز از پروفیل نبشی یا IPE ضعیف در نظر گرفته می‌شوند. نوع بادبند نیز به صورت هشتی در نظر گرفته می‌شود. قاب دارای چهار دهانه ۵ متری بوده که دهانه‌های اول و آخر دارای سیستم مهاربندی از نوع بادبند زانویی می‌باشد. ارتفاع طبقات نیز ۳ متر فرض شده و فولاد مصرفی از نوع نرمه ساختمانی معادل با ST37 در نظر گرفته می‌شود. درابتدا قاب بر اساس روش استاتیکی تحلیل و در ادامه طراحی شده و در ادامه، تحلیل حرارتی بر روی آن انجام می‌گردد و در نهایت امر رفتار آن تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی بررسی می‌گردد (شکل ۶).

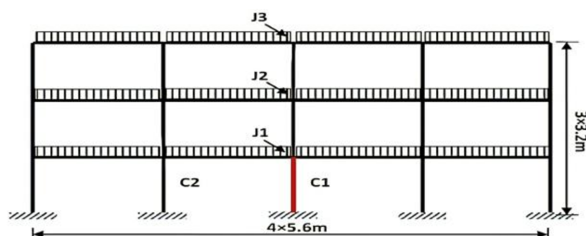


شکل ۶ شکل قاب ۶ طبقه با مقاطع آن در نرم‌افزار ABAQUS

حال با مشخص شدن طراحی قاب نمونه، در ادامه تحلیل قاب تحت اثر بار آتش‌سوزی بدون در نظر گرفتن اثرات خرابی پیش رونده در نرم‌افزار ABAQUS بررسی می‌شود. به منظور ترسیم هندسه قاب از حالت ترسیم Wire2d استفاده می‌شود. این حالت به معنی استفاده از المان خطی در فضای دو بعدی می‌باشد که برای مدل‌سازی قاب (به صورت دو بعدی) مناسب است. در ادامه مشخصات مصالح فولادی که یکی از مهمترین بخش‌ها به منظور تحلیل می‌باشد تعریف می‌شود. مشخصات الاستیسیته و پلاستیسیته فولاد در این حالت تابعی از دما و تغییرات آن در حین آتش‌سوزی است که بنا بر آنچه که بیان شد در این قسمت در نرم‌افزار وارد می‌گردد.

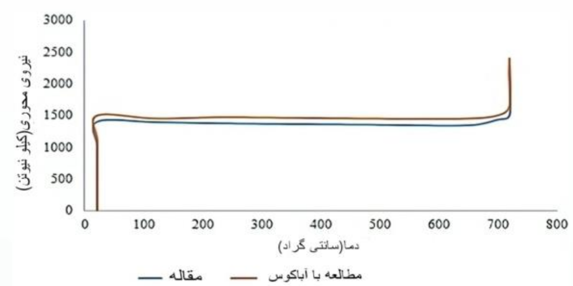
صحت‌سنجی

به منظور اعتبارسنجی مطالعه‌ای تحت عنوان تحلیل خرابی پیش‌رونده ساختمان فولادی تحت بار حریق [24] مورد توجه و مبنای کار قرار گرفت. سازه مورد نظر یک قاب فولادی ۳ طبقه ۴ دهانه بوده که تحت اثر بار حریق و گسیختگی پیش‌رونده ناشی از آن ستون میانی آن تسلیم شده (حذف می‌گردد) و رفتار قاب پس از حذف ستون ارزیابی می‌شود. در شکل (۷) هندسه و ابعاد قاب نشان داده شده است. در تحقیق انجام شده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به منظور مطالعه روی چند نمونه قاب استفاده گردید. هدف از بررسی قاب مورد نظر ارزیابی نیروی محوری ستون C2 پس از حذف ستون C1 بوده که به این منظور مجددا با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نتایج ارزیابی گردیده و با نتایج تحقیق انجام شده مقایسه می‌گردد.



شکل ۷ هندسه و ابعاد قاب فولادی ۳ طبقه و موقعیت ستون حذف شده تحت اثر پدیده خرابی ناشی از بار حریق [24]

براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل انجام شده مشخص گردید که اختلاف خطای نسبی حداکثر ۱۰ درصدی بین نتایج به دست آمده برای نیروی محوری ستون C2 حاصل از مطالعه انجام شده در قبل (نتایج مقاله) و مطالعه حاضر وجود دارد. لذا دقت نتایج مناسب بوده و به منظور کاهش مقدار خطای نسبی می‌توان تعداد تقسیمات المان‌های قاب (مش‌بندی) را افزایش داد. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد تقسیمات المان‌های قاب (تیر و ستون) دقت تحلیل و زمان آن افزایش می‌یابد (شکل ۸).

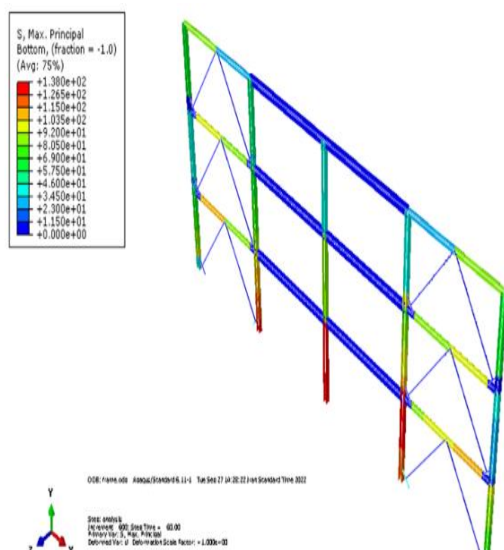


شکل ۸ مقایسه تغییرات نیروی محوری ستون C2 در دماهای مختلف براساس نتایج تحقیق انجام شده (مقاله) و تحقیق حاضر (به‌ترتیب منحنی‌های آبی و قرمز رنگ)

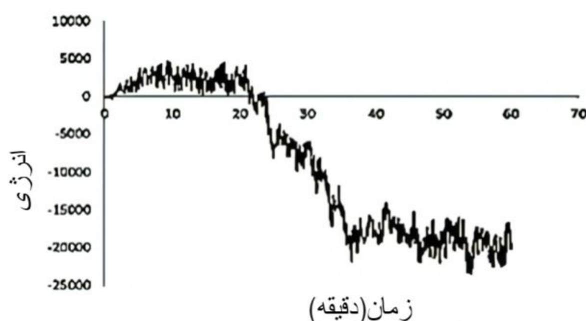
نتایج تحلیل‌ها

در ابتدا قاب ۳ طبقه در نرم‌افزار ABAQUS مدل گردیده و تحت بار حریق تحلیل می‌شود. همان طور که در شکل (۹) مشخص است ستون میانی و دو ستون اطراف آن و همچنین تیرهای طبقات اول و دوم در کناره‌های قاب دارای تنش‌های حرارتی بیشتری بوده است. بر این اساس در ادامه تمرکز بر روی ستون‌های نام برده بوده و یک‌به‌یک حذف شده و رفتار قاب ارزیابی می‌گردد. در این خصوص ابتدا ستون میانی و در ادامه ستون‌های طرفین آن حذف می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار SAP اقدام به ارزیابی قاب می‌گردد.

در شکل (۱۰) نیز منحنی انرژی-زمان قاب در طول زمان حریق نشان داده شده است. همان طور که مشخص است در بازه زمانی ۲۰ تا ۳۵ دقیقه منحنی انرژی دارای شیب بسیار شدید و ناگهانی را داشته و این موضوع نشان می‌دهد که زمان شروع تسلیم اولین المان از دقیقه ۲۰ بوده و تسلیم شدن المان‌ها در بازه زمانی نام‌برده اتفاق افتاده است. لذا تا ۲۰ دقیقه از زمان شروع حریق هنوز تسلیم المان‌ها آغاز نشده و پس از دقیقه ۳۵ نیز المان‌ها تسلیم شده و وارد فاز انهدام شده‌اند و تسلیم اعضا از دقیقه ۳۵ به بعد نمی‌تواند منجر به انهدام اعضا گردد چرا که باز توزیع نیروها و تنش‌های ناشی از بار حریق انجام شده و نیروها از المان‌های آسیب دیده به سایر اعضای سازه انتقال یافته‌اند.



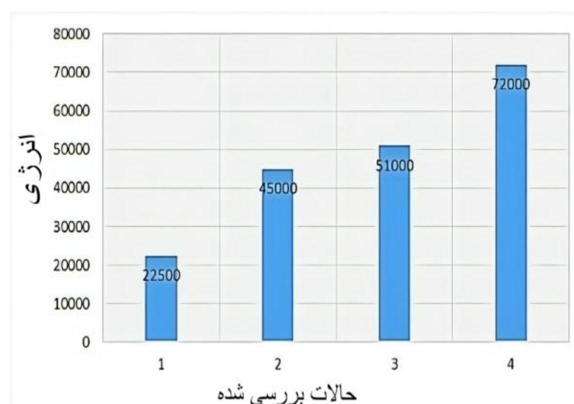
شکل ۹ توزیع تنش حرارتی در قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق



شکل ۱۰ منحنی انرژی-زمان قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم محور ناشی از بار حریق

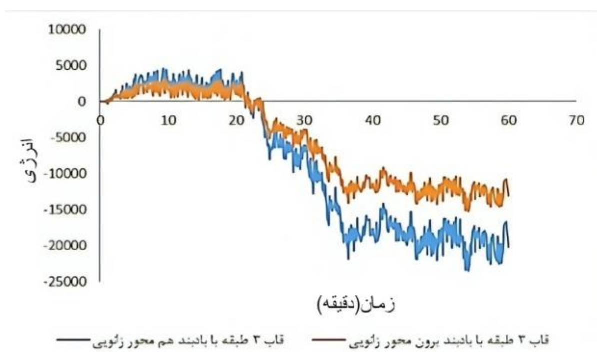
در ادامه منحنی‌های انرژی زمان برای سه حالت حذف المان‌ها به قرار: ۱) حذف ستون میانی قاب، ۲) حذف ستون میانی و ستون سمت راست و ۳) حذف ستون‌های میانی و طرفین آن بررسی و مقایسه می‌گردد.

همان طور کـه در شـکل (۱۱) مشـخص اسـت در حالـت حذف تک ستون میانی مقدار انرژی تا ۲ برابـر و بـرای حالـت حذف دو ستون انرژی تا ۲/۳ برابر و بـرای حالـت حـذف سـه ستون انرژی تا ۳/۲ برابر در مقایسه با حالتی که المـانی حـذف نشده افزایش یافته است. لذا نرخ افـزایش بـرای حالـت حـذف تک ستون میانی نسبت به سایر حالات (به صورت نسبی) بیشتر بوده است و این به معنای آن است که حذف ستون میانی قـاب بر اثر حریق بیشترین تأثیر را بر افزایش خسارات وارده بر سازه را دارد. لذا توجه ویژه بر مقاوم‌سازی المان‌های باربر اصلی و به خصوص ستونهای میانی سـازه کـه بخـش بیشـتری از بارهـای وارده بر سازه را حمل می‌کنند، شود.



شکل ۱۱ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربند هم محور زانویی به ترتیب برای حالات: ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی، ۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست و ۴) حذف ستون میانی و ستون‌های طرفین

با توجه به نتایج برای قاب ۳ طبقه با سیستم بادبند هم محور زانویی بحرانیترین حالت را می‌توان حذف ستون میانی سازه تحت اثر حریق دانست. سپس به بررسی قاب ۳ طبقه فولادی با سیستم بادبند برون‌محور زانویی پرداخته می‌شود و در ابتدا طراحی قاب برای سیستم بادبند برون‌محور کنترل شده تا در ادامه به آنالیز حرارتی آن پرداخته شود. لازم به ذکر است که طول تیر پیوند بر اساس طراحی معمول و بهینه آن (بر اساس رفتار برشی تیر پیوند) برابر با ۱ متر (۰/۲طول دهانه تیر) در نظر گرفته شده است. براساس نتایج از تحلیل قاب‌های ۳ طبقه هم‌محور و برون محور زانویی مشخص گردید که در مجموع قاب با بادبند برون محور زانویی انرژی در حدود ۳۵ درصد کمتر از قاب بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در بازه زمانی کل آن داشته است. این موضوع به دلیل شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور بوده که در خلال وقوع حریق بر اثر قابلیت پذیرش تغییرشکل‌ها بازتوزیع نیروها و جذب و استهلاک انرژی را مرتبا در پی داشته که نتیجه آن کاهش قابل ملاحظه انرژی است (شکل ۱۲).

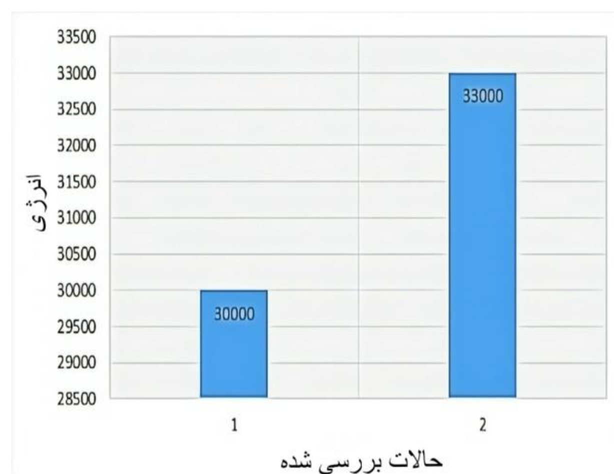


شکل ۱۲ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۳ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی و برون‌محور ناشی از بار حریق

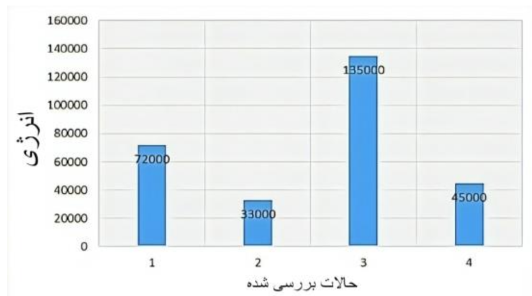
براساس نتایج به دست آمده از تحلیل مشخص شد که برای قاب با بادبند زانویی برون‌محور، فقط ستون میانی دارای شرایط بحرانی بوده‌است. در توجیه نتیجه حاصل شده می‌توان چنین بیان نمود که قاب فولادی با مهاربند برون‌محور دارای شکل‌پذیری بالایی می‌باشد. این مسئله در ترکیب با المان زانویی منجر به افزایش قابل توجه شکل‌پذیری قاب می‌گردد. قاب ۳ طبقه فولادی به عنوان قاب صلب بوده که در صورت استفاده از بادبند هم‌محور، باعث صلبیت و سختی بسیار بیشتری می‌گردد. لیکن در صورت استفاده از بادبند برون‌محورکه همراه با المان زانویی است، شکل‌پذیری بسیار قابل توجهی را داشته و رفتار لرزه‌ای و رفتار آن در مقابل سایر بارها از جمله بار حریق را بهبود می‌بخشد. لذا در ادامه تنها سناریوی حذف ستون میانی برای قاب مورد نظر بررسی می‌گردد. براساس نتایج به دست آمده (شکل ۱۳) مقدار انرژی برای حالتی که ستون میانی حذف گردیده برای قاب ۳ طبقه با بادبند برون محور زانویی، در حدود ۱۰ درصد انرژی افزایش یافته است. هر چند انرژی قاب با بادبند برون‌محور زانویی بیش از انرژی برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی بوده (در حدود ۳۳ درصد بیشتر) اما حذف ستون در قاب با بادبند برون‌محور زانویی تنها باعث افزایش انرژی به میزان ۱۰ درصد شده است.

این در حالی است که حذف ستون در قاب با بادبند هم‌محور زانویی باعث افزایش ۳/۲ برابری انرژی شده است و از این منظر قاب با بادبند زانویی برون‌محور مطلوبتر است. مضاف بر اینکه برای قاب با بادبند برون‌محور تنها یک ستون شرایط بحرانی را داشته و این در حالی است که برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی تعداد ۳ ستون وضعیت بحرانی دارد که در مجموع این مسئله مطلوب بودن رفتار بادبند برون‌محور زانویی در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق را نشان می‌دهد (شکل ۱۴). نتایج دو مسئله این را نشان می‌دهد اولا آنکه استفاده از بادبند برون‌محور به سبب شکل‌پذیری بالای آن و تأثیر بسیار قابل توجه آن بر قاب‌های کوتاه، علاوه بر رفتار لرزه‌ای مناسب، سبب رفتار و عملکرد بسیار عالی در برابر خرابی پیش‌رونده شده است. ثانیا استفاده از المان زانویی تأثیر بسیاری بر رفتار و عملکرد سازه‌های کوتاه با سیستم مهاربندی زانویی در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار حریق دارد.

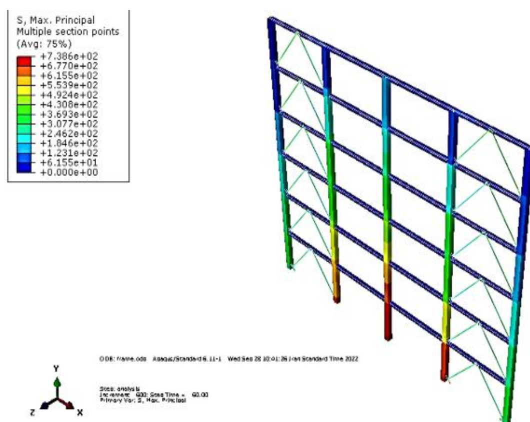
برای قاب ۶ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی براساس تحلیل حرارتی مشخص شد که ستون میانی و ستون‌های دو طرف آن در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم شرایط بحرانی را دارند. لذا سناریوی حذف ستون شامل حذف ستون میانی در طبقه اول و سپس حذف ستون میانی در طبقه دوم و در گام سوم و چهارم حذف ستون‌های طرفین ستون میانی طبقه اول به ترتیب و اولویت بحرانی بودن آنها می‌باشد (شکل۱۵).



شکل ۱۳ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربند برون محور زانویی به ترتیب برای حالات: ۱) بدون حذف المان و ۲) حذف ستون میانی



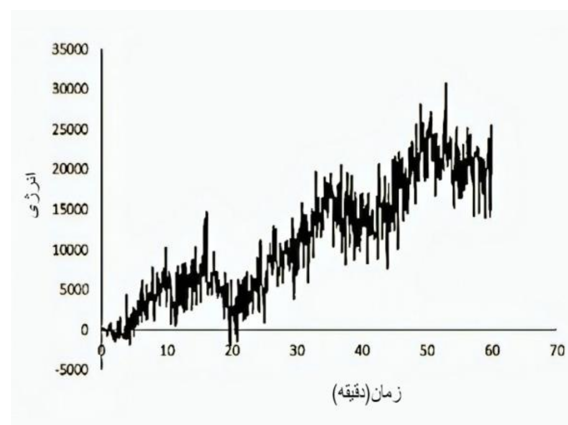
شکل ۱۴ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده به ترتیب برای حالات: ۱) قاب با بادبند هم‌محور زانویی، ۲) قاب با بادبند برون‌محور زانویی، ۳) قاب با بادبند هم‌محور معمولی و ۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی



شکل ۱۵ توزیع تنش ناشی از بار حریق در قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور در نرم‌افزار ABAQUS

نکته دوم در خصوص زمان شروع تسلیم شدن المان‌ها بر اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق است. برای قاب ۶ طبقه برخلاف قاب ۳ طبقه شرایط خرابی به صورت پیوسته طی دو مرحله رخ داده است. با توجه به شکل (۱۶) در ابتدا و تا دقیقه ۲۰ حریق در سازه گسترش یافته و شرایط تسلیم شدن المان از دقیقه ۲۰ تا حدود دقیقه ۳۵ اتفاق افتاده است و از دقیقه ۳۵ تا حدود دقیقه ۴۵ سازه شرایط تقریبا ثابتی را تجربه کرده و مجددا از دقیقه ۴۵ تا ۵۰ شیب منحنی صعودی شده و المان‌های بعدی تسلیم شده‌اند. براساس نتایج تحلیل مرحله‌ای مشاهده گردید که روال تسلیم المان‌ها به مانند قاب ۳ طبقه بود که در ابتدا ستون میانی و بعد به ترتیب ستون‌های سمت راست و چپ در طبقه اول تسلیم شدند و در ادامه ستون میانی در طبقه دوم تسلیم گردید. بالطبع با افزایش زمان حریق پیش‌بینی

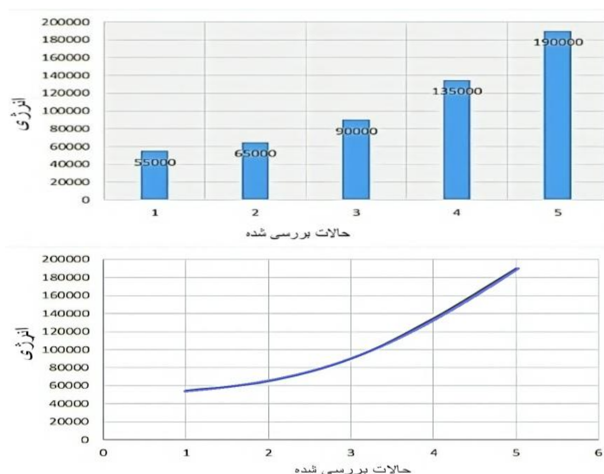
می‌گردد تا حدود ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه پس از شروع حریق ستون‌های همجوار ستون میانی در طبقه دوم و در ادامه ستون میانی در طبقه سوم و ستون‌های همجوار آن و... نیز تسلیم گردند. لذا وضعیت خرابی پیش‌رونده در قاب به طور کلی مشخص گردید که در حالت کلی در ابتدا ستون میانی در هر طبقه و بعد ستون‌های دو طرف آن و به همین منوال برای طبقات بالا پی‌درپی تسلیم می‌گردند.



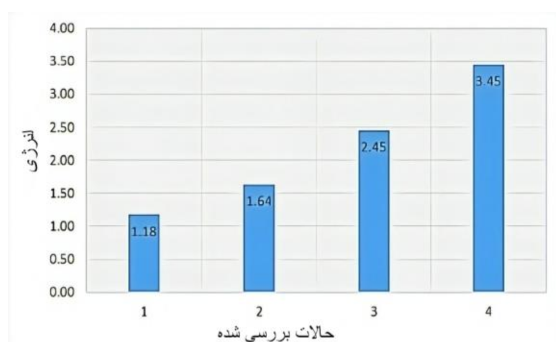
شکل ۱۶ منحنی انرژی زمان قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق

حال و در ادامه براساس سناریوهای مطرح شده که در زیر آورده شده المان‌ها حذف و رفتار قاب بررسی می‌گردد: ۱) حذف ستون میانی در طبقه اول، ۲) حذف ستون سمت راست و ستون میانی در طبقه اول، ۳) حذف ستون‌های طرفین و ستون میانی در طبقه اول و ۴) حذف ستون میانی در طبقه دوم شکل (۱۷ و ۱۸)

برای قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی مشاهده گردید که نسبت افزایش انرژی برای هر حالت حذف المان پی‌درپی با افزایش تعداد المان‌های حذف شده نه تنها به صورت صعودی و قابل توجهی افزایش یافته بلکه ارتباط بین تعداد المان‌های حذف شده و انرژی به صورت غیرخطی است (شکل ۱۷) که این نکته بسیار جالب توجه است. این موضوع بسیار مهم است که حذف هر المان تحت اثر بار آتش‌سوزی منجر به افزایش قابل توجه انرژی می‌گردد که در بخش‌های قبل بررسی گردید لیکن موضوع بسیار پر اهمیتتر از موقعیت المان حذف شده است.

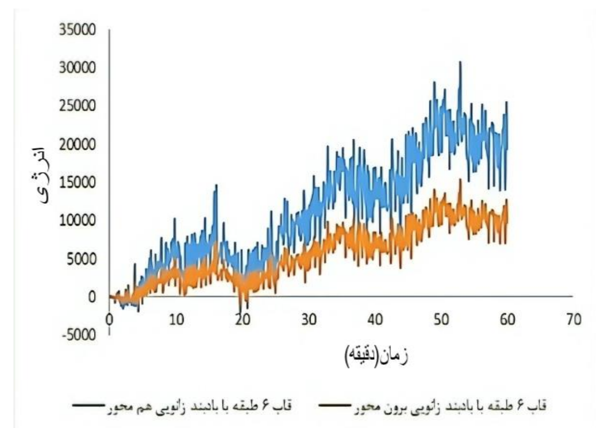


شکل ۱۷ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای: ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی در طبقه اول، ۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست آن در طبقه اول، ۴) حذف ستون میانی و ستون‌های طرفین آن در طبقه اول و ۵) حذف ستون میانی در طبقه اول و ستون‌های طرفین آن و ستون میانی طبقه دوم



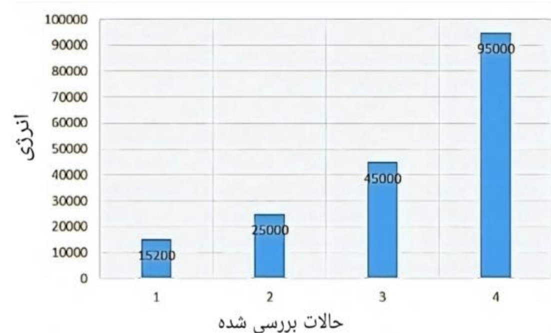
شکل ۱۸ مقایسه نسبت انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات ۲ تا ۵ نسبت به حالت ۱ (بدون حذف المان)

براساس نتایج تحلیل قاب‌های ۶ طبقه هم‌محور و برون‌محور زانویی مشخص شد که در قاب با بادبند برون‌محور زانویی انرژی در حدود ۵۰ درصد کمتر از قاب با بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در کل بازه زمانی داشته است. در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای المان زانویی، خود قاب و همچنین مهاربندهای برون‌محور دارای شکل‌پذیری بالایی بوده است. قاب جزو قاب‌های با ارتفاع متوسط و نسبتا بلند بوده و دارای شکل‌پذیری نسبتا مناسب و بالایی می‌باشد (شکل ۱۹).



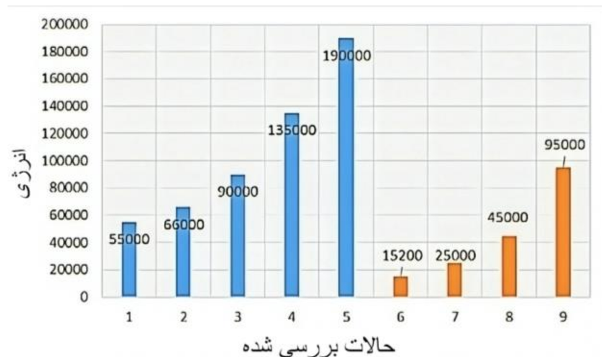
شکل ۱۹ مقایسه منحنی‌های انرژی- زمان قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور ناشی از بار حریق

براساس نتایج به دست آمده از تحلیل قاب ۶ طبقه برون‌محور به ترتیب تنش‌های ایجاد شده در ستون میانی در طبقه اول و ستون سمت راست آن و در ادامه ستون میانی در طبقه دوم باعث بحرانیتر شدن آنها گردیدند. لذا ۳ سناریوی حذف ستون در این حالت مورد توجه است که در ادامه نتایج حاصل از حذف آنها بررسی می‌گردد (شکل ۲۰).

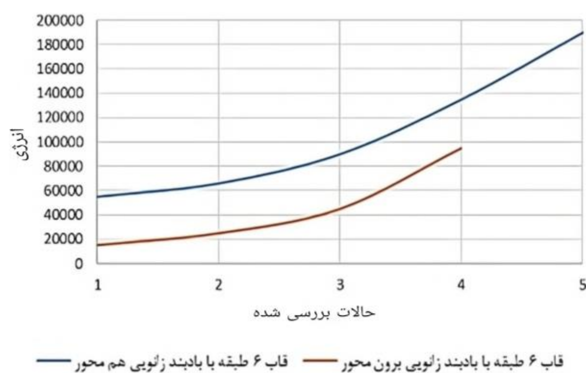


شکل ۲۰ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی در طبقه اول، ۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست آن در طبقه اول و ۴) حذف ستون میانی در طبقه دوم

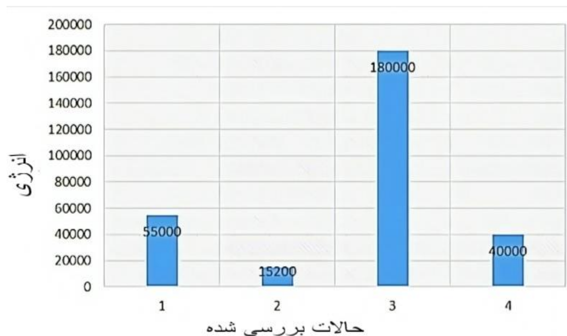
همچنین براساس مقایسه نتایج انرژی مشخص شد که استفاده از بادبند برون‌محور زانویی برای قاب ۶ طبقه نیز کارایی و شرایط مطلوبتری را در مقایسه با بادبند هم‌محور زانویی دارد که در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری بادبند برون محور و المان زانویی، شکل‌پذیری بالای قاب نیز در مشارکت با شکل‌پذیری بادبندی و المان زانویی در مجموع شکل‌پذیری سازه را به میزان قابل توجهی افزایش داده واین موضوع منجر به رفتار بسیار مطلوب قاب تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی می‌گردد (شکل ۲۱-۲۳).



شکل ۲۱ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف بدون و با حذف المان (۵ حالت برای بادبند هم‌محور و ۴ حالت برای بادبند برون محور)



شکل ۲۲ مقایسه تغییرات انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف حذف المان (۵ حالت برای بادبند هم محور و ۴ حالت برای بادبند برون‌محور زانویی)

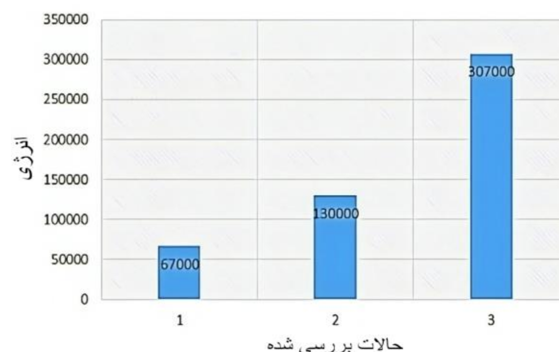


شکل ۲۳ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش رونده به ترتیب برای حالات: ۱) قاب با بادبند هم محور زانویی، ۲) قاب با بادبند برون محور زانویی، ۳) قاب با بادبند هم محور معمولی و ۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی

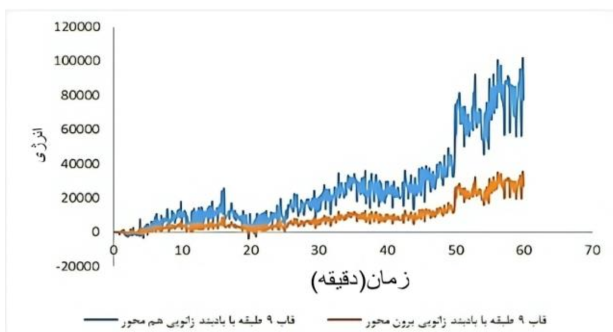
براساس مطالعات مشخص شد که در قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم محور، حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش ۱/۴۹ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم باعث افزایش ۴/۶ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه قابل توجه است (شکل ۲۴).

براساس تحلیل انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که نوع بادبند تأثیر بسیار قابل توجه را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبندی هم‌محور داشته است. شکل (۲۵) براین اساس مقدار انرژی در حالت نام‌برده تا ۶۵ درصد کاهش یافته که بسیار مطلوب است. لازم به ذکر است که قاب ۹ طبقه خود شکل‌پذیری بالایی را داشته که در ترکیب با بادبند برون‌محور و دارای المان زانویی یک سیستم سازه‌ای با شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بسیار مناسب را در پی دارد.

نتایج به دست آمده نشان داد که در حالت استفاده از بادبند زانویی برون‌محور به ترتیب میزان انرژی برای ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و ۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم در مقایسه با استفاده از بادبند زانویی هم‌محور ۷۷ و ۷۰ و ۷۹ درصد کاهش داشته که بسیار قابل توجه است. در حقیقت ترکیبی از شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور و المان زانویی بادبند منجر به جذب و کاهش انرژی تا حد بسیار قابل توجهی گردیده است. قابلیت شکل‌پذیری و پذیرش تغییرشکل‌های زیاد و رفتار غیرخطی هر دو المان یعنی بادبند برون‌محور و المان زانویی متصل به آن باعث این نتیجه مطلوب گردیده است (شکل ۲۷ و ۲۸).

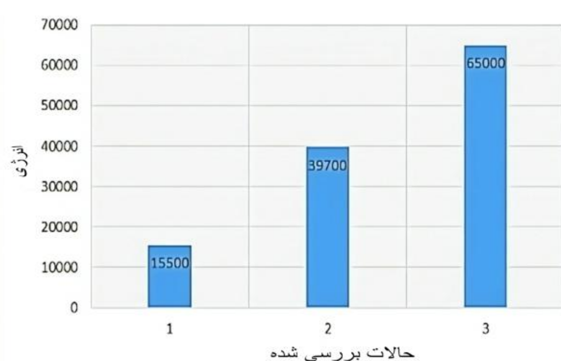


شکل ۲۴ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و ۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم

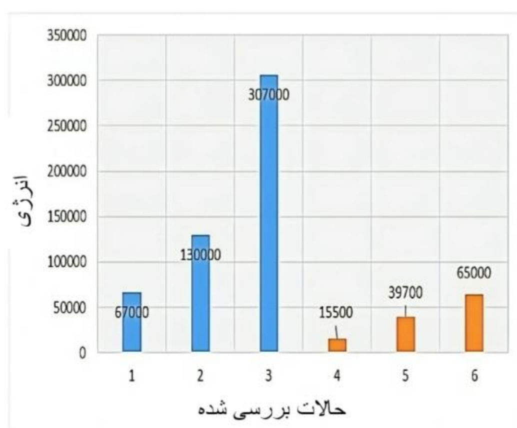


شکل ۲۵ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور ناشی از بار حریق

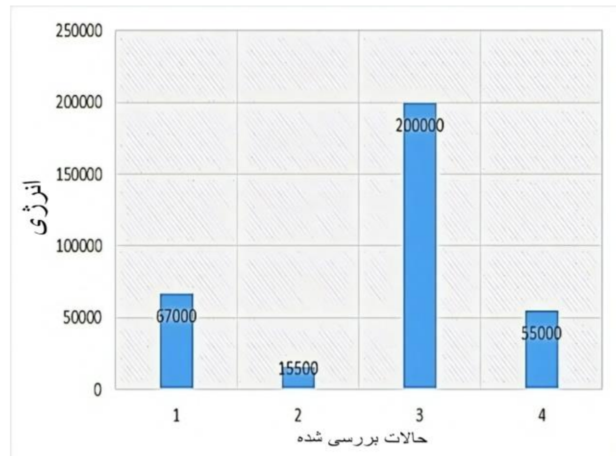
براساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم بحرانیترین شرایط را در پی دارد. لذا در ادامه براساس دو سناریوی حذف ستون در طبقه اول و در ادامه در طبقه دوم بررسی می‌گردد (شکل ۲۶).



شکل ۲۶ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند برون محور زانویی به ترتیب برای حالات: ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و ۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم



شکل ۲۷ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف بدون و با حذف المان (۳ حالت برای بادبند هم‌محور و ۳حالت برای بادبند برون‌محور)



شکل ۲۸ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده به ترتیب برای حالات: ۱) قاب با بادبند هم‌محور زانویی، ۲) قاب با بادبند برون‌محور زانویی، ۳) قاب با بادبند هم‌محور معمولی و ۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی

نتایج

نتایج به دست آمده برای قاب ۳ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. برای قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور مشخص گردید که ستون میانی و دو ستون اطراف آن در طبقه اول و همچنین تیرهای طبقات اول و دوم در کناره‌های قاب دارای تنش‌های حرارتی بیشتری بوده‌اند. با توجه به اینکه عناصر لرزه‌بر اصلی قاب، شامل ستون‌ها و بادبندها می‌باشند؛ لذا خرابی پیش‌رونده برای ستون‌ها در موقعیت‌های نام‌برده دارای اهمیت بوده و خرابی پیش‌رونده با حذف این المان‌ها تحت بار حریق بایستی بررسی شود. همچنین مقاوم‌سازی این ستون‌ها به منظور کنترل و جلوگیری از پیشروی آسیب‌دیدگی در سایر اعضا مهم بوده و توصیه می‌گردد.

۲. براساس نتایج به دست آمده برای قاب با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که مقدار انرژی برای حالتی که ستون میانی حذف گردیده در حدود ۱۰درصد افزایش یافته است. هر چند انرژی قاب با بادبند برون‌محور زانویی بیش از انرژی برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی بوده است اما حذف ستون در قاب با بادبند برون‌محور زانویی تنها باعث افزایش انرژی به میزان ۱۰ درصد شده است و این در حالی است که حذف ستون در قاب با بادبند هم‌محور زانویی باعث افزایش ۳/۲ برابری انرژی شده است و از این جهت بالطبع قاب با بادبند زانویی برون‌محور بسیار مطلوب است.

۳. با توجه به نتایج به دست آمده برای قاب ۳ طبقه با سیستم بادبند هم‌محور زانویی بحرانیترین حالت را می‌توان حذف ستون میانی سازه تحت اثر حریق دانست.

۴. برای قاب با بادبند برون‌محور تنها یک ستون شرایط بحرانی را داشته و این در حالی است که برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی تعداد ۳ ستون وضعیت بحرانی را داشته است. در مجموع این مسئله مطلوب بودن رفتار بادبند برون‌محور زانویی را در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق نشان می‌دهد.

۵. بر اساس نتایج به دست آمده از مقایسه بادبندهای هم‌محور و برون‌محور زانویی و معمولی مشخص گردید که استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۸۸ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را در بر داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی این مقدار در حدود ۳۶ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

نتایج به دست آمده برای قاب ۶ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. برای قاب ۶ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی براساس تحلیل حرارتی انجام شده به وضوح مشخص گردید که ستون میانی و ستون‌های دو طرف آن در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم شرایط بحرانی را دارند.

۲. بر اساس نتایج به دست آمده به ترتیب میزان انرژی برای حالات حذف ستون میانی در طبقه اول، حذف ستون میانی و ستون سمت راست طبقه اول، حذف ستون‌های نام‌برده در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم به میزان ۱/۶۵ و ۱/۸ و ۲ برابر افزایش یافته است. همچنین براساس مقایسه نتایج انرژی مجددا مشخص شد که استفاده از بادبند برون‌محور زانویی برای قاب ۶ طبقه نیز کارایی و شرایط بسیار مطلوبتری را در مقایسه با بادبند هم‌محور زانویی دارد. در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری بادبند برون‌محور و المان زانویی، شکل‌پذیری بالای قاب نیز در مشارکت با شکل‌پذیری بادبند و المان زانویی در مجموع شکل‌پذیری سازه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد که این

موضوع منجر به رفتار بسیار مطلوب قاب تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی خواهد شد.

۳. براساس نتایج به‌دست آمده از شکل (۲۳) مقایسه بادبندهای هم‌محور و برون‌محور زانویی و معمولی در ساختمان ۶ طبقه مشخص شد که استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۷۰ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی، این مقدار در حدود ۶۲ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

نتایج به دست آمده برای قاب ۹ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. منحنی انرژی برای قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور روند یکنواختی را برای بازه زمانی از شروع حریق تا حدود ۳۰ دقیقه اول نشان می‌دهد. این به معنای آن نیست که سازه در این بازه زمانی شرایط مطلوبی را داشته و اعضا و المان‌های سازه در معرض تسلیم و انهدام نیستند؛ بلکه سازه به سبب شکل‌پذیری بالا، سعی بر حفظ شرایط اولیه و تعادل و بازتوزیع نیروها دارد. اما از دقیقه ۳۰ به بعد با یک خیز نسبتا ملایم و در ادامه مجددا شرایط بازتوزیع و حفظ تعادل در نهایت تا دقیقه ۴۵ سازه با شکل‌پذیری بالایی که دارد شرایط را حفظ می‌کند. اما از دقیقه ۴۵ به بعد تسلیم اعضا و المان‌ها و به صورت پی‌درپی منجر به افزایش انرژی می‌گردد و در بازه زمانی اخیر افزایش انرژی با نرخ صعودی بسیار بالایی می‌باشد.

۲. بر اساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور مشخص شد که حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش ۱/۹۴ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم منجر به افزایش ۴/۶ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه اخیر بسیار قابل توجه است.

۳. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش ۲/۶ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور شده است. همچنین حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم منجر به افزایش ۴/۲ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه اخیر قابل توجه است.

۴. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که نوع بادبند تأثیر بسیار قابل توجه را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبند هم‌محور داشته است. بر این اساس مقدار انرژی در حالت نام‌برده تا ۶۵ درصد کاهش یافته که بسیار مطلوب است. لازم به ذکر است که قاب ۹ طبقه خود شکل‌پذیری بالایی را داشته که در ترکیب با بادبند برون‌محور و دارای المان زانویی، یک سیستم سازه‌ای با شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بسیار مناسب را در پی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم بحرانیترین شرایط را در پی دارد.

۵. در مجموع در حالت استفاده از بادبند زانویی برون محور به ترتیب انرژی برای ۱) بدون حذف المان، ۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و ۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم در مقایسه با استفاده از بادبند زانویی هم محور ۷۷ و ۷۰ و ۷۹ درصد کاهش داشته که بسیار قابل توجه است. در حقیقت ترکیبی از شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور و المان زانویی بادبند منجر به جذب و کاهش انرژی تا حد بسیار قابل توجهی گردیده است. در حقیقت قابلیت شکل‌پذیری و پذیرش تغییرشکل‌های زیاد و رفتار غیرخطی هر دو المان یعنی بادبند برون‌محور و المان زانویی متصل به آن سبب این نتیجه مطلوب شده است. استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۷۰ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی، این مقدار در حدود ۶۲ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

سپاسگزاری

مراجع

1. ASCE/SEI 7-10, “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, American Society of Civil Engineers, ASCE, Structural Engineering Institude, SEI, October, 2013.
2. J. Jiang, G.Q. Li, A. Usmani,” Progressive Collapse Mechanisms of Steel Frames Exposed to Fire,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 17, issue. 3, pp. 381-398, 2014.
3. Biritish Standard Institute, “Loading for building, Part 6: Code of practice for dead and imposed loads”, London, United Kingdom, 6991, 2011.
4. J.P.C. Rodrigues, I.C. Neves, J.C. Valente, “Experimental Research on the Critical Temperature of Compressed Steel Elements with Restrained Thermal Elongation,” *Fire Safety Journal*, vol. 35, Issue. 2, pp. 77-98, 2000.
5. H.M. Ali, P.E. Senseny, R.L. Alpert,” Lateral Displacement and Collapse of Single-Story Steel Frames in Uncontrolled Fire,” *Engineering Structures*, vol. 26, Issue. 5, pp. 593-607, 2004.
6. S. Orton, J.O. Jirsa, O. Bayrak,” Carbon Fiber Reinforced Polymer for Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Collapse,” *ACI Structural Jurnal*, vol. 107, issue. 4, 2009.
7. C. Crosti, “Structural Analysis of Steel Structures under Fire Loading,” *Acta Polytecnica*, vol. 49, no. 1, 2009.
8. A.M. Correia, T.A.C. Pires, J.P.C. Rodrigues, “Behaviour of Steel Columns Subjected to Fire,” *Proc. of the Sixth International Seminar on Fire & Explosion Hazards (FEH6)*, (ISBN-13:978-981-08-7724-8 e), 2010.
9. K. Galal, T. El-Sawy,”Effect of Retrofit Strategies on Mitigating Progressive Collapse of Steel Frame Structures,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, Issue. 4, pp. 520-531, 2011.
10. M. Haghaegh, J. Asghari Marenani, M. Rohani Manesh, “Assessment of Sesmic Behavior Knee Brace Compared with X and Chevron Bracing in Steel Frame*,” journal of structural engineering*, vol.12, issue.3, pp. 59-67, 2015. (In Persian)
11. H.D. Mahale, “Behaviour of Steel Structure under the Effect of Fire Loading,” *International Journal of Engineering Research and Applications*, ISSN: 2248-9622, vol. 6, no. 5, pp. 42-46, 2016.
12. A. Parvini, A.H. Saadatmand Bahri, ” Evaluation of Progressive Collapse Scenario in Steel Framed Structures with Knee Brace under Gravity and Seismic Load,” *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication, TOJDAC*. Special Edition, DOI NO: 10.7456/1060AGSE/078, 2016.
13. J. Kim, A. Dawoon,,” Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action,” *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol.18, issue.4, pp.455-465, 2016.
14. X. Lu, Y. L. Hung Guan, M. Ying, ” Progressive Collapse Analysis of a Typical Super-Tall Reinforced Concrete Frame-Core Tube Building Exposed to Extreme Fires,” *FireTechnology*, vol. 53, no. 1, pp. 107-133, 2017.
15. G. Abdollahzadeh, R. Shalikar, ” Retrofitting of Steel Moment-Resisting Frames under Fire Loading against Progressive Collapse,” *International Journal of Steel Structures*, vol. 17, no. 4, pp.1597-1611, 2017.
16. R. Rahnavard, N. Siahpolo, “ Function Comparison between Moment Frame and Moment Frame with Centrally Braces in High-Rise Structures under effect of Progressive Collapse,” *Iranian Structural Engineering Assosiation*

,*Sientific Research Journal (Structural and Construction Engineering)*, vol.4, Issue.4, no.14, PP.42-57, 2017.(In Persian)

17. B. Kordbagh, M. Mohammadi, “Influence of Panel Zone on Progressive Collapse Resistance of Steel Structures,” *American Society of Civil Engineers*, vol. 32, issue. 3, 2018.
18. M,R., Ameri, A. Massumi, H. Masoomi, ” Effect of Structural Redundancy on Progressive Collapse Resistance Eenhancement in RC Frame Structures,” *Journal of Performance of Construced Facilities*, vol. 33, no. 1, 2018.
19. M.R. Kafash, A. Karamodin, M. Moghiman, “Investigatin of the Behavior of Special Steel Concentrically Braced Frames under Post Earthquake Fire Loading,” *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 33, no. 29, PP. 31-48, 2020. (In Persian)
20. E. Mohammadi Dehcheshmeh, M. Kamalizad, V. Broujerdian, G. Ghodrati Amiri,”Progressive Collapse in Steel Moment Frame Structures: Multi Parameter Study,” *journal of structural and construction engineering*, vol. 9, no. 58, pp. 20-38, 2022. (In Persian)
21. Y. Cao, J. Jiang, Y. Lu, W. Chen, J. Ye, “Progressive Collapse of Steel Structures Exposed to Fire: A Critical Review,” *journal of constructional steel research*, vol.207, 107985, 2023.
22. ABAQUS 6.14 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.
23. M. Yahyai, A. Rezaeian, M. Safaeian, “Response of Steel Box Culmn in Fire Conditions,” *Journal of Structural and Consrtuction Engineering*, vol. 4, Issue. 1, no.10, pp. 101-112, 2017. (In Persian)
24. R. Sun,, Z. Huang, L. Burgess, “Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions,” *Engineering structures*, vol.34, pp. 400-413, 2012.